

## 【補助事業概要の広報資料】

補助事業番号 27-129  
補助事業名 平成27年度 歯のエナメル質・象牙質形状の口腔内同時高精度測定システムの開発補助事業  
補助事業者名 慶應義塾大学 青山英樹

### 1 研究の概要

歯科の高度治療の実現のため、患者の歯の形状測定は重要である。現状では、患者の歯の石膏モデルを作製し、それを口腔外において測定する手法が採用されている。石膏モデルを用いた方法では、エナメル質の外表面形状の測定となり、エナメル質の厚さの測定はできない。エナメル質は、歯の最表層を形成するリン酸カルシウムの結晶で、半透明をしている。象牙質は、エナメル質より高度が低い黄色組織である。歯にレーザを投光したとき、エナメル質は半透明であるため、エナメル質表面の点で照射光の一部が反射、残りの光線は、象牙質まで到達し、その表面の点で反射される。(エナメル質を透過中にも一部は拡散反射する。) それらの反射光を集光レンズを介してCCDまたはCMOSで検出し、形状を同定するとき、エナメル質、象牙質で反射する反射光を分離して検出することが必要である。

本研究では、空間コード化法と位相シフト法を組み合わせることにより、エナメル質、象牙質で反射する反射光を分離する独自の方法を提案した。また、同提案方法を検証する基礎実験装置を開発し、エナメル質、象牙質にお形状を同時に測定することができることを基礎実験により確認した。

### 2 研究の目的と背景

歯科治療において、患者の歯の形状測定は必須である。現状では、患者の歯の石膏モデルを作製し、それを口腔外において測定する手法が採用されているが、エナメル質の外表面形状の測定となり、エナメル質の厚さの測定はできない。エナメル質と象牙質の形状の測定データを得ることにより、従来できなかった治療・予防が可能となる。また、口腔内での高速・高精度測定が可能になることにより、健康時の歯の個人情報データとして保存することができるようになり、治療時において高度治療に活用できるとともに、身元確認のためのデータとしても有効となる。

エナメル質と象牙質の形状の測定装置として、OCT(近赤外光を用いた光干渉断層画像診断法: Optical Coherence Tomography)が開発されようとしている。同方法は、大がかりであるとともに非常に高価であり、一般に開業医まで広く普及させることは困難である。

本研究では、開業歯科医が歯のエナメル質と象牙質の形状を口腔内において、高速かつ高精度に計測を行い、患者の歯の高度な治療を行うことを可能とする測定機を開発するための

基礎研究を行うことを目的としている。

### 3 研究内容

#### (1) 空間コード化法による形状測定システムの構築

空間コード化法概念図をFig.1に示す。同方法は、数種類の縞模様の投影と撮影を繰り返す。その撮影データをカメラの画素ごとに解析することによって特徴量を識別する方法である。縞模様の撮影データは、0（暗）あるいは1（明）の2進数で表現することができ、 $N$ 種類の縞模様を投影・撮影することにより、 $2^N$ 種類の縞情報を獲得できる。これによって得られる縞番号が空間コード化法における特徴量となる。

この際、注目画素の0（暗）、1（明）の判断方法として、Fig. 1のように各縞模様に対して0（暗）、1（明）を反転させた縞模様を投影・撮影し、2つの画像の輝度値を比較することによって画素の0（暗）、1（明）を判断する。仮に1層目の反射率が2層目の反射率よりも大きい場合、画素 $(x, y)$ において判断される0（暗）、1（明）は、2層目の反射光にかかわらず1層目の反射光情報の0（暗）、1（明）と一致する。したがって、画素 $(x, y)$ において得られる縞番号 $n(x, y)$ は、1層目に実際に投影されている縞番号  $n_1(x, y)$ を示すことになり、式(1)の関係が成り立つ。

$$n_1(x, y) = n(x, y) \tag{1}$$

逆に2層目の反射率が1層目の反射率よりも大きい場合は、画素 $(x, y)$ では2層目からの反射光による縞番号 $n_2(x, y)$ が取得されることになる。このように空間コード化法を2層物体に適用すると、一方の層の特徴量を取得できる。

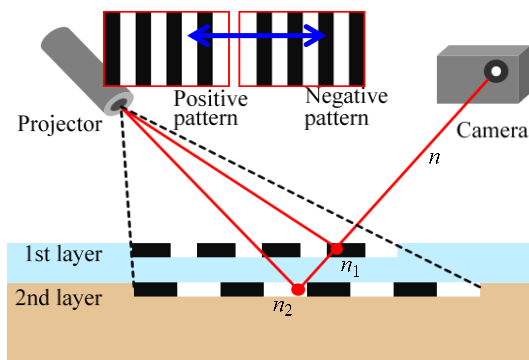


Fig.1 Space encoding method

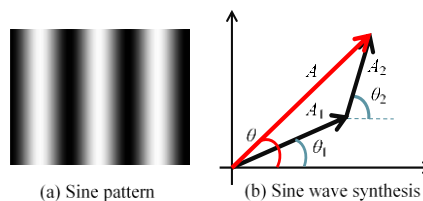


Fig.2 Phase shift method

#### (2) 位相シフト法による形状測定システムの構築

位相シフト法では、Fig. 2(a)に示すような光強度が正弦波状に変化するパターンの位相を少しずつ変化させながら投影・撮影し、画像解析によって特徴量である位相を抽出する。位相を $\pi/2$ ずつ変化させた4種類の画像を用いると、各画像の輝度値を $I_n(x, y)$  ( $n = 0, 1, 2, 3$ )として、位相 $\theta(x, y)$ は式(2)のように推定できる。

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)} \right) \quad (2)$$

しかし、位相シフト法を2層物体に適用した場合、推定される位相は、注目画素において1層目からの反射光と2層目からの反射光が合成された正弦波の位相を示すことになる。合成正弦波の振幅を  $A(x, y)$ 、1層目と2層目からの反射光の振幅と位相をそれぞれ  $A_1(x, y)$ ,  $\theta_1(x, y)$ ,  $A_2(x, y)$ ,  $\theta_2(x, y)$  とすると、式 (3), (4) の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} A \sin \theta &= A_1 \sin \theta_1 + A_2 \sin \theta_2 \\ A \cos \theta &= A_1 \cos \theta_1 + A_2 \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (3), (4)$$

Fig. 2(b) は、振幅と位相の関係をベクトルとして表している。結果として、各層の特徴量となる位相を個別に取得することはできない。

### (3) 空間コード化法と位相シフト法を組み合わせた測定法・システムの開発

空間コード化法と位相シフト法を併用して歯のエナメル質と象牙質のような2層物体の形状を測定する手法を提案する。各層の特徴量となる縞番号および位相を画素ごとに抽出することにより、各層それぞれの形状測定が可能になる。各層の縞番号と位相は、以下の手順で求める。

- (a) 空間コード化法により縞番号  $n(x, y)$  を取得するとともに、式(1)を用いて1層目の縞番号  $n_1(x, y)$  を取得する。この際、2層目の反射率が1層目の反射率よりも大きければ、2層目の縞番号  $n_2(x, y)$  が取得されることになる。この場合は、物体表面にパウダリングを施して1層目からの反射光強度を2層目よりも強くする。パウダリングは粉末を吹き付ける処理であり、歯科治療の歯形状測定に利用される。
- (b) プロジェクタ、カメラ、被測定物の位置姿勢を変えずに位相シフト法で測定を行い、合成正弦波の振幅  $A(x, y)$  と位相  $\theta(x, y)$  を取得する。
- (c) 1層目の縞番号  $n_1(x, y)$  に対応する1層目の位相  $\theta_1(x, y)$  を算出する。
- (d) 1層目と2層目の反射光の振幅比を  $R$  とすると、式(5)の関係が成り立つ。式 (5) を式 (3), (4) に代入し、 $A_1(x, y)$  について導出すると式(6)が成立し、式 (6) を解いて  $A_1(x, y)$  を算出する。

$$A_2 = RA_1 \quad (5)$$

$$(1 - R^2)A_1^2 - 2(\sin \theta \sin \theta_1 + \cos \theta \cos \theta_1)AA_1 + A^2 = 0 \quad (6)$$

- (e) 2層目の位相  $\theta_2(x, y)$  を式(7)により算出する。

$$\theta_2 = \tan^{-1} (A \sin \theta - A_1 \sin \theta_1, A \cos \theta - A_1 \cos \theta_1) \quad (7)$$

以上の手順により、カメラの全画素において1層目と2層目の特徴量を抽出し、各層の形状を測定する。光が物体の境界や内部を通過することにより起こる光学現象の影響を考慮していないため、2層目の結果には誤差が含まれる。本研究では、光学現象のうち、散乱、屈折、減衰の3つの現象をモデル化して測定結果の補正を行い、最終的な形状を決定する。

#### (4) 測定機の評価

提案手法の有効性を確認するため、光学的に歯のエナメル質に近い材質である被測定物としてガラスを対象とし、Fig. 3に示すように象牙質を想定する白色板の上に配置して測定実験を行った。ガラスの寸法は、 $100 \times 100 \times 10$  mmであり、四隅は10 mmの  $R$  をもつ。プロジェクタの解像度は $1024 \times 768$ であり、カメラの解像度は $3680 \times 2456$ を $600 \times 400$  に間引いて測定を行った。

提案手法により得られた最終的な測定結果をFig. 4に示す。1層の部分で青色、2層の部分で1層目を青色、2層目を赤色で表示しており、各層の形状を独立に測定できていることが確認できる。  $y = 100$ ラインの  $x = 150$ から  $x = 450$ まで (Fig. 3において赤線で示す部分) の高さ方向の測定結果をFig. 5, 6に示す。Fig. 5は光学現象の影響を補正する前の結果であり、Fig. 6は補正と平滑化を行った結果である。1層目はガラスの厚みである10 mmの高さを測定できており、補正を行うことによって象牙質を想定した白色板の高さ (0 mm) を測定できていることが確認できる。



Fig.3 Measured object

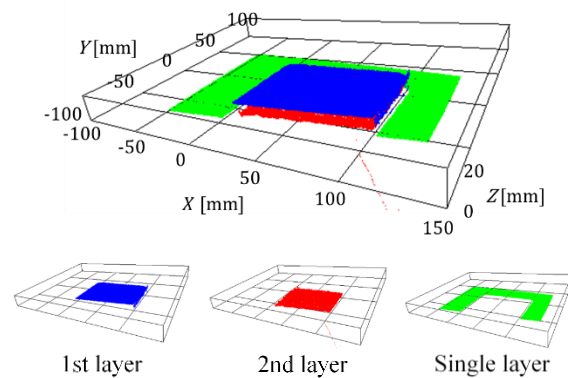


Fig.4 Reconstruction results of the measured point:

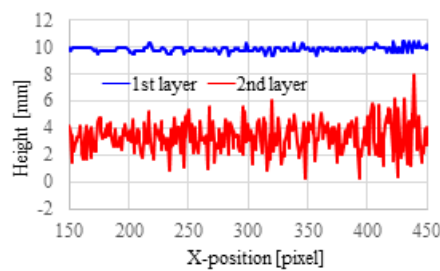


Fig.5 Height of the measured points

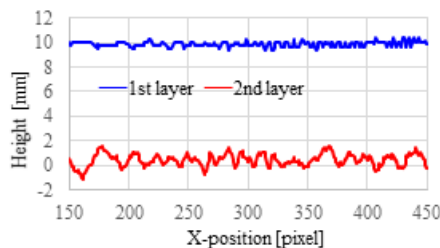


Fig.6 Corrected height of the measured points

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究では、半透明体で覆われた物体の半透明体形状とその下の物体形状を同時に高速測定する方法を提案し、実験により検証を行った。この成果により、今後、小型化と高精度化が実現されれば、口内測定機として実用化され、高度な歯の治療法が確立されることが期待される。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究は、歯のエナメル質と象牙質の同時・高速測定を可能とする測定機の開発の基礎となる成果を得ることを目的としている。補助事業者（研究者）は、歯のCAD/CAMシステム（歯の設計製作システム）の開発にも従事しており、本研究の成果が実用化されれば、歯科医療において、治療歯の測定から修復歯科の設計および製作まで、一貫した歯科治療システムを開発することに結びつく。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

知財・に至る成果は得られなかった。国内学会で1回、国際会議で1回の発表を行った。平成28年度において、論文としてまとめ、学会（精密工学会）へ投稿する予定である。

##### 【国内発表】

林晃究, 青山英樹（代表）, 歯のエナメル質と象牙質の同時形状測定を目的とした基礎研究, 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 105-106.

##### 【国際会議】

Terumi Hayashi, Hideki Aoyama（代表）, Basic Method for Simultaneous Measurement of Enamel and Dentin Shape of Human Teeth, Proceedings of ACDDE2015 (Asian Conference on Design and Digital Engineering), pp. 1-8 (USB).

#### 7 補助事業に係る成果物

##### (1) 補助事業により作成したもの

補助事業の経費では、成果物の出版は行っていない。

##### (2) (1) 以外で当事業において作成したもの

平成27年度の成果は、<http://ddm.sd.keio.ac.jp/2015/index.html> (<http://ddm.sd.keio.ac.jp/2015/27-129%20seika.pdf>) に記されている。

#### 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 慶應義塾大学 理工学部 青山英樹研究室

(ケイオウギジユクダイガク リコウガクブ アオヤマヒデキケンキョウシツ)

住 所： 〒223-8522

神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

申請者： 教授 青山 英樹（アオヤマ ヒデキ）

担当部署： システムデザイン工学科（システムデザインコウガッカ）

E-mail： haoyama@sd.keio.ac.jp

URL： <http://ddm.sd.keio.ac.jp/>